

# PHOTOMULTIPLIER

**Patent number:** JP8148113  
**Publication date:** 1996-06-07  
**Inventor:** SUYAMA MOTOHIRO; MURAMATSU MASA HARU;  
 OISHI MAKOTO; ISHIKAWA YOSHITAKA; YAMAMOTO  
 AKINAGA  
**Applicant:** HAMAMATSU PHOTONICS KK  
**Classification:**  
 - International: **H01J43/04; H01J43/12; H01J43/00; (IPC1-7):**  
 H01J43/12; H01L31/107  
 - european: H01J43/04; H01J43/12  
**Application number:** JP19940290070 19941124  
**Priority number(s):** JP19940290070 19941124

Also published as:

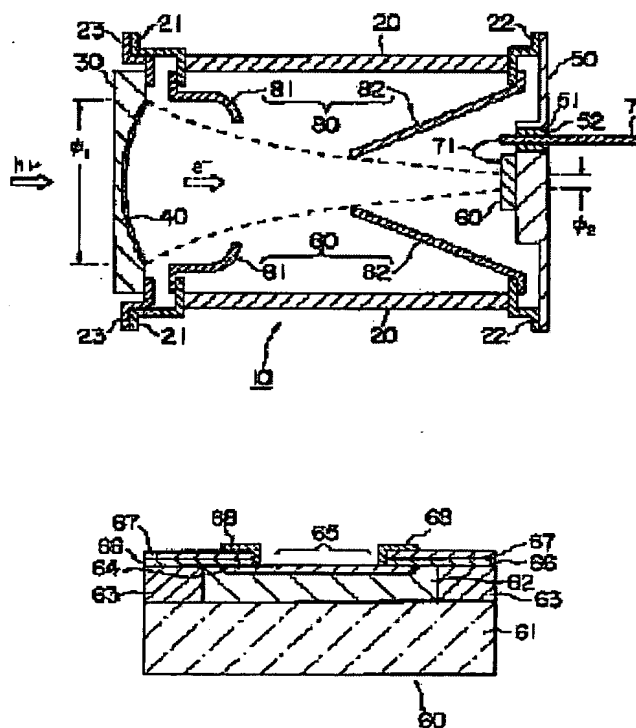
EP0714117 (A)  
 US5654536 (A)  
 EP0714117 (A)  
 EP0714117 (B)

Report a data error he

## Abstract of JP8148113

**PURPOSE:** To largely improve energy resolution by disposing a carrier multiplication layer obtained by epitaxial growth and a breakdown voltage control layer of dopant concentration higher than the former on a semiconductor element opposite to a photocathode.

**CONSTITUTION:** A photocathode 40 for producing photoelectrons due to photons, a semiconductor element 66 for multiplying photoelectrons, opposite to it, and electron lenses 80 converging photoelectrons are disposed in a high-vacuum vessel comprising an enclosure 20, a light incident window 30 and a stem 50. In a photomultiplier tube 10, as above, a carrier multiplication layer 62 with dopant obtained by epitaxial growth being uniformly distributed is disposed on a semiconductor substrate 61 of a semiconductor element 60. A breakdown voltage control layer 64 of dopant concentration higher than the former is disposed on the layer. A photoelectron receiving portions 65 is partly exposed by means of an insulating layer 67 and an ohmic electrode layer 68. Accordingly, uniformity in avalanche multiplication gain for photoelectrons is attached and energy resolution is largely raised, so that high sensitive and quantitative measurement of faint light becomes possible.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-148113

(43) 公開日 平成8年(1996)6月7日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 J 43/12				
H 0 1 L 31/107			H 0 1 L 31/ 10	B

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 9 頁)

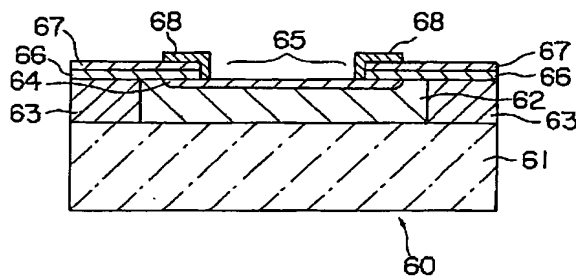
(21) 出願番号	特願平6-290070	(71) 出願人	000236436 浜松ホトニクス株式会社 静岡県浜松市市野町1126番地の1
(22) 出願日	平成6年(1994)11月24日	(72) 発明者	須山 本比呂 静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ トニクス株式会社内
		(72) 発明者	村松 雅治 静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ トニクス株式会社内
		(72) 発明者	大石 誠 静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ トニクス株式会社内
		(74) 代理人	弁理士 長谷川 芳樹 (外3名) 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光電子増倍管

(57) 【要約】

【目的】 光電子に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティを達成することにより、エネルギー分解能を大幅に向上させる。

【構成】 光電子増倍管は、高真空中に保持された外囲器の内部に、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極から放出された光電子を検出する半導体素子60とを備えている。この半導体素子60は、第1導電型の半導体基板61と、この半導体基板61上にエピタキシャル成長された第2導電型のキャリア増倍層62と、このキャリア増倍層62上に形成されてドーパント濃度が当該キャリア増倍層62よりも大きい第2導電型の降伏電圧制御層64と、この降伏電圧制御層64上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層64の表面を光電子の受容部65として部分的に露出させるオーミック電極層68とから構成されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 内部を高真空に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極と対向して前記外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を検出する半導体素子とを備え、前記半導体素子は、第 1 導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第 2 導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第 2 導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層の表面を前記光電子の受容部として部分的に露出させるオーミック電極層とから構成されていることを特徴とする光電子増倍管。

【請求項 2】 前記光電陰極と前記半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を収束して当該半導体素子の前記受容部に導く電子レンズをさらに備え、前記受容部の口径は 10 mm 以下であることを特徴とする請求項 1 記載の光電子増倍管。

【請求項 3】 前記降伏電圧制御層の前記受容部として露出された表面の周辺は、窒化物からなる絶縁層により被覆されていることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の光電子増倍管。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、肉眼によって感知できない微弱な光を量子的限界に達する感度で検出する光電子増倍管であり、より詳細には、生体微量物質から発生する蛍光を単一光電子計数によって定量的に計測する光電子増倍管に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来の光電子増倍管には各種のものがあり、例えば、光電陰極から放出された光電子を増幅して検出する半導体素子として、アバランシェ・フォトダイオード (APD; Avalanche Photo Diode) を内蔵したものがあ。このような APD、特にバルク型の APD は、拡散法やイオン注入法などによって半導体基板に形成された各種導電型領域から構成されている。

【0003】なお、このような光電子増倍管に関する先行技術は、

"United States Patent, No.5146296, Sep., 1992",

"LASER FOCUS WORLD, pp.125-132, Nov., 1993"

などに詳細に記載されている。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の光電子増倍管においては、光電子に対するアバランシェ増倍ゲインが APD における光電子の入射位置に大

きく依存して異なり、良好なユニフォミティを得ることができない。そのため、複数の光電子が APD の受容部の異なる位置に入射した場合、エネルギー分解能が実用的に不十分であるという問題がある。

【0005】この問題を解決する方法の一つとして、光電子を収束して APD の受容部に照射させる電子レンズが設置されている。しかしながら、この電子レンズによって光電陰極から放出された光電子を APD の受容部上の一点に収束させることは、原理的に不可能である。そのため、個々の光電子は APD の受容部の異なる位置に入射するので、やはり光電子に対するアバランシェ増倍ゲインの不均一性を十分に解消するに至っていない。

【0006】なお、このような電子レンズの設置に関しては、例えば特開平 5-54849 号公報に詳細に記載されている。

【0007】また、上記の問題を解決する方法の一つとして、光電陰極から放出された光電子を増幅して検出する半導体素子として、フォトダイオード (PD; Photo Diode) を内蔵することが行われている。この PD は、複数の個を平面的に配列した位置検出素子として構成されている。しかしながら、このような PD はアバランシェ増倍ゲインを有しないので、トータルゲインが比較的小さくなっている。そのため、単一光電子を容易に検出することはできないという問題がある。

【0008】なお、このような光電子増倍管に関する先行技術は、

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A310, pp.261-266, 1991"

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A315, pp.375-384, 1992"

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A330, pp.93-99, 1993"

"HYBRID PHOTOMULTIPLIER TUBES, Delft Electronische Producten"

などに詳細に記載されている。

【0009】そこで、本発明は、以上の問題点を鑑みてなされたものであり、アバランシェ増倍層を有する半導体素子を内蔵した電子管において、光電子に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティを達成することにより、エネルギー分解能を大幅に向上させる光電子増倍管を提供することを目的とする。

## 【0010】

【課題を解決するための手段】本発明の光電子増倍管は、上記の目的を達成するために、内部を高真空に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極と対向して外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された光電子を検出する半導体素子とを備えている。

【0011】ここで、半導体素子は、第 1 導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して

10

20

30

40

50

形成された第2導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第2導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層の表面を光電子の受容部として部分的に露出させるオーミック電極層とから構成されていることを特徴とする。

【0012】なお、光電陰極と半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された光電子を収束して当該半導体素子の受容部に導く電子レンズをさらに備え、受容部の口径は10mm以下であることを特徴としてもよい。

【0013】また、降伏電圧制御層の受容部として露出された表面の周辺は、窒化物からなる絶縁層により被覆されていることを特徴としてもよい。

【0014】

【作用】本発明の光電子増倍管においては、外部電圧源から所定の電圧を印加すると、外囲器の内部には、半導体素子から光電陰極に向かう電界が発生する。また、半導体素子の内部には、逆バイアス電圧が印加されるので、半導体基板とキャリア増倍層との接合面から降伏電圧制御層に向かって延びた空乏層（アバランシェ増倍領域）が生成する。

【0015】ここで、外部の微弱な光が光子として外囲器の入射窓に入射すると、この光子は入射窓の内部を透過して光電陰極に吸収される。そのため、光電陰極の価電子帯に位置した電子が伝導帯に励起し、負の電子親和力作用によって光電子として真空中に放出される。このように光電陰極から放出された光電子は、半導体素子から光電陰極に向かう電界に対向して半導体素子の受容部に入射する。

【0016】半導体素子の受容部に入射した光電子は、キャリア増倍層の内部で所定のエネルギーを失う毎に一对の電子-正孔対を生成する。そのため、単一の光電子の入射によって、数千組の電子-正孔対が二次キャリアとして発生する。この過程における光電子に対するゲイン、すなわち電子照射ゲインは、光電子の入射エネルギーによって決定されているので、半導体素子の受容部における光電子の入射位置に対して良好なユニフォミティを有している。

【0017】この電子照射直後に増倍した二次キャリアは、キャリア増倍層から半導体基板または降伏電圧制御層に向かう電界に対向してドリフトする。この二次キャリアの一方のキャリアは、キャリア増倍層の内部に生成したアバランシェ増倍領域に到達する。このようにドリフトした一方のキャリアは、キャリア増倍層を構成する分子に衝突してイオン化を起こす過程、すなわちアバランシェ増倍を繰り返すので、さらに数十倍の電子-正孔対を生成する。このアバランシェ増倍した一方のキャリアは、キャリア増倍層から半導体基板または降伏電圧制

御層に向かう電界に対向してドリフトし、半導体基板または降伏電圧制御層に到達する。

【0018】ここで、キャリア増倍層はこれと異なる導電型を有する半導体基板上にエピタキシャル成長して形成されることにより、そのドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、この過程における光電子に対するゲイン、すなわちアバランシェ増倍ゲインは、キャリア増倍層中におけるキャリアの発生位置に対する依存を低減しており、良好なユニフォミティを有している。

【0019】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流が、オーミック電極層から外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0020】

【実施例】以下、本発明の光電子増倍管に係る実施例の構成および作用について、図1ないし図5を参照して詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0021】第1実施例

図1に示すように、本実施例の光電子増倍管10は、中空円筒状の外囲器20の両端をそれぞれ入射窓30とステム50とによって気密に封止させ、圧力 $10^{-4}$  Torr程度の高真空に内部を保持して構成されている。この光電子増倍管10の内部には、電子レンズ80として2個のフォーカス電極81、82がそれぞれ光電陰極30及びステム50に近接して設置され、半導体素子60がステム50上に設置されている。

【0022】外囲器20は、中空円筒状のガラス製側管である。この外囲器20の両端には、2段に折り曲げられた中空円筒状の取付材21、22がそれぞれ設置されている。なお、これら取付材21、22は、それぞれコパール金属で形成されている。

【0023】入射窓30は、円板状のガラス製面板であり、大気側及び真空側の各表面としてそれぞれ平面及び凹面を有している。この入射窓30の真空側周縁部には、2段に折り曲げられた中空円筒状の取付材23が設置されている。2個の取付材21、23の各端部を部分的に溶接することにより、外囲器20と入射窓30とは一体に構成されている。なお、入射窓30のガラス材料は、測定対象とする光の波長に対して透過性を有している。

【0024】ステム50は、円板状の金属製面板であり、真空側に半導体素子60の設置領域として凸部を有している。このステム50の真空側周縁部と取付材22

の端部とを部分的に溶接することにより、外囲器 20 とステム 50 とは一体に構成されている。また、ステム 50 の中央部付近には、半導体素子 60 の後述する端子棒 72 を挿通する貫通穴 51 が形成されている。なお、このステム 50 は、コパール金属で形成されている。

【0025】入射窓 30 の真空側表面には、薄膜状の光電陰極 40 が蒸着して形成されている。この光電陰極 40 は、外部電圧源（図示しない）から取付材 23 を介して所定の電圧を印加されており、例えば電位約  $-15 \text{ kV}$  に保持されている。なお、光電陰極 40 は、アルカリ金属、例えば  $\text{K}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Cs}$ 、 $\text{Sb}$  等で形成されている。また、光電陰極 40 において、入射光  $h\nu$  を受容して所定の量子効率で光電変換して光電子  $e^-$  を生成する口径  $\phi_1$  は、約  $16 \text{ mm}$  である。

【0026】取付材 21 の端部には、一段折り曲げられて貫通した椀状のフォーカス電極 81 が部分的に溶接によって接合されている。このフォーカス電極 81 は、ステム 50 に対向して収束する姿勢で設置されている。フォーカス電極 81 は、外部電圧源（図示しない）から取付材 21 を介して光電陰極 40 の印加電圧と同一の電圧を印加され、例えば電位約  $-15 \text{ kV}$  に保持されている。なお、フォーカス電極 81 は、ステンレスから形成されている。

【0027】取付材 22 の端部には、一段折り曲げられて貫通した中空円錐台状のフォーカス電極 82 が部分的に溶接によって接合されている。このフォーカス電極 82 は、ステム 50 に対向して開放する姿勢で設置されている。フォーカス電極 82 は、外部電圧源（図示しない）から取付材 22 を介して所定の電圧を印加され、例えば電位約  $0 \text{ V}$  に保持されている。なお、フォーカス電極 82 は、ステンレスから形成されている。

【0028】ステム 50 の真空側凸部上には、半導体素子 60 が後述する受容部 65 を光電陰極 50 に対向させて設置されている。この半導体素子 60 の後述する電極層 66 と、ステム 50 の貫通穴 51 を気密に挿通した金属製の端子棒 72 とは、金属製のワイヤー 71 の端部をそれぞれボンディングすることにより、電気的に接続されている。半導体素子 60 の表面側は、外部電圧源（図示しない）から端子棒 72 及びワイヤー 71 を介して所定の電圧を印加され、例えば電位約  $-145 \text{ V}$  に保持されている。また、半導体素子 60 の裏面側は、外部電圧源（図示しない）からステム 50 を介して電子レンズ 81 の印加電圧と同一の電圧を印加され、例えば電位約  $0 \text{ V}$  に保持されている。これにより、半導体素子 60 は全体として逆バイアス電圧を印加されている。

【0029】なお、端子棒 72 は、半導体素子 60 から出力した検出信号を処理する外部演算装置（図示しない）に接続されている。また、貫通穴 51 と端子棒 72 との間には、円筒状の絶縁材 52 が気密に封止して設置されている。さらに、半導体素子 60 において、光電子

$e^-$  を受容して所定の増倍率で有効に増幅する口径  $\phi_2$  は、約  $3 \text{ mm}$  である。

【0030】図 2 に示すように、四角柱状の半導体素子 60 は、APD として構成されている。この半導体素子 60 は、光電陰極 30 から放出されて電子レンズ 80 によって収束された光電子  $e^-$  を後述する受容部 65 に照射され、後述するアバランシェ増倍領域で増幅して検出する半導体検出器である。

【0031】平板状の半導体基板 61 の中央部上には、円板状のキャリア増倍層 62 が形成されている。この半導体基板 61 の周辺部上には、円環状のガードリング層 63 がキャリア増倍層 62 と同一の層厚を有して形成されている。キャリア増倍層 62 の表面中央領域には、円板状の降伏電圧制御層 64 が形成されている。

【0032】半導体基板 61 は、第 1 導電型すなわち  $n$  型の  $\text{Si}$  で形成された高濃度単結晶ウエハである。この半導体基板 61 は、層厚約  $500 \mu\text{m}$  を有し、 $n$  型ドーパントとして  $\text{P}$  を濃度約  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  でドーブされ、比抵抗約  $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$  を有している。

【0033】キャリア増倍層 62 は、第 2 導電型すなわち  $p$  型の  $\text{Si}$  を半導体基板 61 上にエピタキシャル成長して形成された低濃度半導体層である。このキャリア増倍層 62 は、層厚約  $10 \mu\text{m}$  を有し、 $p$  型ドーパントとして  $\text{B}$  を濃度約  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  でドーブされ、比抵抗約  $1 \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$  を有している。キャリア増倍層 62 のドーパント濃度は、降伏電圧に接近した電圧を印加したときに半導体基板 61 との接合面から拡がる空乏層が降伏電圧制御層 64 に到達する値である。

【0034】なお、このキャリア増倍層 62 において良好な結晶性を保持してエピタキシャル成長させる層厚  $d$  は、約  $5 \mu\text{m}$  ～ 約  $50 \mu\text{m}$  の範囲に含まれるように設定することが好適である。もし、層厚  $d$  が約  $50 \mu\text{m}$  よりも大きい場合、層厚方向のドーパント濃度の不均一性が顕著になるので、光電子  $e^-$  に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティをキャリアの発生位置に依存して劣化させてしまう。一方、層厚  $d$  が約  $5 \mu\text{m}$  よりも小さい場合、半導体基板 61 から伸びて拡がる空乏層が薄くなるので、光電子  $e^-$  に対する電子照射ゲインを低減させてしまう。

【0035】ここで、層厚  $d$  を約  $10 \mu\text{m}$  に設定した理由は、加速エネルギー約  $15 \text{ keV}$  で照射された光電子  $e^-$  の最大飛程約  $3 \mu\text{m}$  と、後述するアバランシェ増倍領域の層厚約  $3 \mu\text{m}$  とに対して、光電子  $e^-$  に対する電子照射ゲインの揺らぎを最低限に押さえるためにそれぞれ若干の余裕を考慮したからである。

【0036】ガードリング層 63 は、第 1 導電型のドーパントとして  $n$  型ドーパントをキャリア増倍層 62 の周辺部に熱拡散して形成された高濃度半導体層である。このガードリング層 63 は、キャリア増倍層 62 の層厚と同一の層厚約  $10 \mu\text{m}$  を有し、 $n$  型ドーパントとして  $\text{P}$

を半導体基板61の濃度と同一の濃度約 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ でドーピングされている。

【0037】降伏電圧制御層64は、第2導電型のドーパントとしてp型ドーパントをキャリア増倍層62の表面中央領域に熱拡散して形成された高濃度半導体層である。この降伏電圧制御層64は、層厚約 $1 \mu\text{m}$ を有し、p型ドーパントとしてBを半導体基板61の濃度と同一の濃度約 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ でドーピングされている。この降伏電圧制御層64の表面中央部には、円形状の受容部65が光電陰極40に対向して露出されている。

【0038】なお、この受容部65において、光電子 $e^-$ を受容して所定の増倍率で増幅する口径 $\phi_1$ は、約 $10 \text{ mm}$ 以下の範囲に含まれるように設定することが好適である。もし、口径 $\phi_1$ が約 $10 \text{ mm}$ よりも大きい場合、表面方向のドーパント濃度の不均一性が顕著になるので、光電子 $e^-$ に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティをキャリアの発生位置に依存して劣化させてしまう。また、アバランシェ増倍領域の容量が大きくなるので、動作速度が低減してしまう。

【0039】受容部65の周辺部に位置する降伏電圧制御層64の表面周縁部上の大部分と、ガードリング層63の表面全体上とは、2種類の絶縁層66、67が順次積層して形成されている。絶縁層66は、Siの酸化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層66の層厚は約 $200 \text{ nm}$ である。絶縁層67は、Siの窒化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層67の層厚は約 $50 \text{ nm}$ である。

【0040】なお、絶縁層66は、ガードリング層63及び降伏電圧制御層64を形成する際にキャリア増倍層62の結晶性を良好に保持するために、あらかじめキャリア増倍層62の表面領域を酸化させて形成するものである。また、絶縁層67は、光電陰極40を形成する際にキャリア増倍層62、ガードリング層63及び降伏電圧制御層64の半導体特性を劣化させないために、絶縁層66上に堆積させて形成するものである。

【0041】絶縁層67上には、円環状のオーミック電極層68が形成されており、絶縁層66、67の側壁に沿って降伏電圧制御層64の表面周縁部に接触している。このオーミック電極層68は、Alで形成された金属薄膜であり、降伏電圧制御層64に対して良好なオーミック接触性を有している。

【0042】なお、オーミック電極層68は、ワイヤー71のボンディングによって外部電圧源（図示しない）から端子棒72を介して所定の電圧を印加され、例えば $-145 \text{ V}$ の負電位に保持されている。また、半導体基板61は、ステム50上の設置によって外部電圧源（図示しない）から所定の電圧を印加され、例えば $0 \text{ V}$ のグラウンド（GND）電位に保持されている。これにより、 $n^+$ 型の半導体基板61とp型の降伏電圧制御層64との間に、すなわちキャリア増倍層62に空乏層がアバ

ランシェ増倍領域として生成される。

【0043】ここで、受容部65に入射した光電子 $e^-$ がアバランシェ増倍領域に到達するまでの電子照射ゲインは、約 $4 \times 10^3$ である。これらのキャリアがアバランシェ増倍領域を通過して半導体基板61に到達するまでのアバランシェ増倍ゲインは、約30である。これにより、半導体素子60の全体として光電子 $e^-$ に対する二次電子のゲインは、 $10^3$ 程度に達する。

【0044】なお、このような階段接合型のAPDに類似した超階段接合型のAPDに関しては、例えば特開昭50-54290号公報に詳細に記載されている。

【0045】次に、本実施例における半導体素子60の製造工程について説明する。

【0046】第1のステップとして、通常のCVD（Chemical Vapor Deposition）法に基づいて、 $n^+$ 型Siからなる半導体基板61の全面上にp型Siをエピタキシャル成長させてp型のキャリア増倍層62を形成する。次に、通常の熱酸化法に基づいて、キャリア増倍層62の表面領域を酸化させてSiの酸化物からなる絶縁層66を形成する。続いて、通常の熱拡散法に基づいて、絶縁層66の周辺部下方に位置するキャリア増倍層62にn型ドーパントとしてPを選択的に拡散させて $n^+$ 型のガードリング層63を形成する。さらに、通常の熱拡散法に基づいて、絶縁層66の中央部下方に位置するキャリア増倍層62にp型ドーパントとしてBを選択的に拡散させてp型の降伏電圧制御層64を形成する。

【0047】第2のステップとして、通常のCVD法に基づいて、絶縁層66の全面上にSiの窒化物を堆積させて絶縁層67を形成する。次に、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の周辺部上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のドライエッチング法に基づいて、絶縁層66、67の中央部を除去して降伏電圧制御層64の表面を露出させて受容部65を形成する。そして、通常の真空蒸着法に基づいて、受容部65及び絶縁層67上にAlを堆積させてオーミック電極層68を形成する。この後、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の内側部から降伏電圧制御層64の周辺部に至るオーミック電極層68の表面領域上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のウェットエッチング法に基づいて、絶縁層67の周辺部上と降伏電圧制御層64の中央部上とからオーミック電極層68を除去した後、この成形されたオーミック電極層68上からマスク層を除去する。

【0048】次に、本実施例の動作について説明する。

【0049】まず、外部電圧源から所定の電圧を印加すると、光電陰極40及び電子レンズ80に所定電位が生成するとともに、電子レンズ81及びステム50により高い電位が生成する。これにより、真空容器20の内部には、半導体素子60から電子レンズ80、81の各開

口を通過して光電陰極 4 0 に向かう電界が発生する。

【0050】また、オーミック電極層 6 8 に所定電位が生成するとともに、半導体基板 6 1 により高い電位が生成する。これにより、半導体素子 6 0 の内部には、逆バイアス電圧が印加されているので、半導体基板 6 1 とキャリア増倍層 6 2 との接合面から降伏電圧制御層 6 4 に向かって延びた空乏層がアバランシェ増倍領域として生成する。

【0051】ここで、外部の微弱な光、例えば生体微量物質から発生した蛍光が光子  $h\nu$  として入射窓 3 0 の受光部に入射すると、この光子  $h\nu$  は入射窓 3 0 の内部を透過して光電陰極 4 0 に吸収される。そのため、光電陰極 4 0 の価電子帯に位置した電子が伝導帯に励起し、負の電子親和力作用によって光電子  $e^-$  として真空中に放出される。このように光電陰極 4 0 から放出された光電子  $e^-$  は、ステム 5 0 から電子レンズ 8 0 を介して光電陰極 4 0 に向かって開放した電界に対向して移動し、半導体素子 6 0 の受容部 6 5 に入射する。

【0052】なお、電子レンズ 8 0 によって光電陰極 4 0 から放出された光電子  $e^-$  を受容部 6 5 上の一点に収束させることは原理的に不可能であるが、受容部 6 5 の口径  $\phi$ 、程度に収束させることは可能である。そのため、個々の光電子  $e^-$  は受容部 6 5 の異なる位置に入射することになる。

【0053】半導体素子 6 0 の受容部 6 5 に入射した光電子  $e^-$  は、キャリア増倍層 6 2 の内部でエネルギー約 3.6 eV を失う毎に一对の電子-正孔対を生成する。そのため、単一の光電子  $e^-$  の入射によって、数千組の電子-正孔対が二次キャリアとして発生する。このように増倍した二次キャリアは、半導体基板 6 1 から降伏電圧制御層 6 4 に向かう電界に対向してドリフトする。この中で電子は、キャリア増倍層 6 2 の内部に生成したアバランシェ増倍領域に到達する。このとき、光電子  $e^-$  に対する電子照射ゲインは約  $4 \times 10^3$  に達する。

【0054】アバランシェ増倍領域にドリフトした電子は、キャリア増倍層 6 2 を構成する分子に衝突してイオン化を起こすアバランシェ増倍過程を繰り返す。このように増倍した電子は、半導体基板 6 1 からキャリア増倍層 6 2 に向かう電界に対向してドリフトして半導体基板 6 1 に到達する。このとき、アバランシェ増倍ゲインは約 3 0 であり、光電子  $e^-$  に対する電子のトータルゲインは  $10^5$  程度に達する。

【0055】ここで、p 型のキャリア増倍層 6 2 は n<sup>+</sup> 型の半導体基板 6 1 上にエピタキシャル成長して形成されることにより、キャリア増倍層 6 2 のドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、アバランシェ増倍ゲインは、アバランシェ増倍領域中における二次電子の発生位置に対する依存を低減しており、良好なユニフォミティを得ている。

【0056】このような二次電子の増倍量に対応した逆

方向電流が、オーミック電極層 6 8 からワイヤー 7 1 及び端子棒 7 2 を介して外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管 1 0 に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0057】次に、実施例の光電子増倍管と従来例の光電子増倍管とを試作し、比較実験を行った。

【0058】実施例に基づいて試作した光電子増倍管は、上記第 1 実施例の光電子増倍管と全く同様に構成した。すなわち、半導体素子において、半導体材料として Si を用い、エピタキシャル成長によってキャリア増倍層を形成した。一方、従来例として試作した光電子増倍管は、電子増倍部として 1 2 段構成のダイノードを有する通常の光電子増倍管であった。

【0059】なお、従来例の電子増倍部においては、第 1 段ダイノードは GaP で形成され、第 2 段～第 1 2 段ダイノードは Cu-Be で形成されていた。そのため、従来例の光電子増倍管は、特に第 1 段ダイノードの構成材料によって、従来技術として達成可能な最高のエネルギー分解能を有していた。

【0060】これらの光電子増倍管に対して近赤外線を照射することにより、それぞれエネルギー分解能を計測した。ここで、実施例により試作した光電子増倍管の実験条件は次の通りであった。

【0061】

光電子に対する加速電圧 : -17 kV,  
半導体素子に印加したバイアス電圧 : 145 V,  
半導体素子に接続した増幅器 : Ortec Model 142 A,  
光源 : LED(RED),  
雰囲気温度 : 25 °C.

また、従来例により試作した光電子増倍管の実験条件は次の通りであった。

【0062】

光電子に対する加速電圧 : -2.000 kV,  
半導体素子に接続した増幅器 : Canberra Model 2 005,  
光源 : LED(RED),  
雰囲気温度 : 25 °C.

図 3 に、実施例により試作した光電子増倍管の出力パルス波高分布を示す。図 4 に、従来例により試作した光電子増倍管の出力パルス波高分布を示す。これらのグラフにおいては、横軸はエネルギー較正を施されて入射光子のエネルギー量に対応した Channel Number であり、縦軸は各 Channel Number に対応したエネルギー量を有する入射光子を検出した Counts である。

【0063】この結果、従来の光電子増倍管において単

一光電子に対するエネルギー分解能30%~100%に比較すると、本発明の光電子増倍管において単一光電子に対するエネルギー分解能は14%と格段に向上していることがわかる。また、半導体素子に接続した増幅器によるノイズを加味した条件の下においても、単一光電子に対するエネルギー分解能は理論上ほとんど劣化しない。したがって、半導体素子のキャリア増倍層におけるゲインのユニフォミティを達成することにより、入射光子に対するエネルギー分解能を大幅に向上させることができる。

【0064】ここで、半導体素子としてPDを内蔵した従来の電子管では、半導体素子に接続した増幅器によるノイズを除去した理想的条件の下に、単一光電子に対するエネルギー分解能4.3%が得られる。しかしながら、光電子に対するトータルゲインが $4 \times 10^3$ 程度と比較的小さいために、増幅器によるノイズを加味した現実的条件の下には、単一光電子に対するエネルギー分解能40%~70%に低減してしまう。

【0065】また、多段のダイノードと陽極とを内蔵した従来のPMT (Photomultiplier Tube) では、初段のダイノードによる二次電子増倍率が10と比較的小さい。しかしながら、本発明の光電子増倍管では、初段の降伏電圧制御層64による二次電子増倍率は $4 \times 10^3$ であるので、従来のPMTにおける二次電子増倍率よりもはるかに大きくなっている。なお、この従来のPMTと比較すると、本発明の光電子増倍管におけるエネルギー分解能の向上は、初段のダイノードによる二次電子増倍率が大きいことに起因している。

#### 【0066】第2実施例

本実施例は、上記第1実施例の光電子増倍管と比較し、半導体素子の一部のみを異ならせて構成したものである。

【0067】図5に示すように、四角柱状の半導体素子60は、上記第1実施例とほぼ同様にしてAPDとして構成されている。ただし、上記第1実施例と異なり、キャリア増倍層62は、層厚約 $30 \mu\text{m}$ を有し、p型ドープメントとしてBを濃度約 $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ でドープされ、比抵抗約 $10 \sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ を有して形成されている。また、ガードリング層63は、キャリア増倍層62の層厚と同一の層厚約 $50 \mu\text{m}$ を有して形成されている。

【0068】さらに、ガードリング層63の中央部には、上記第1実施例と異なり、円環状凹型の分離溝69が半導体基板61の表面に達する深さを有して形成されている。この分離溝69の表面全体には、絶縁層70が堆積して形成されている。

【0069】この絶縁層70は、Siの窒化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層70の層厚は約100nmである。絶縁層70は、光電陰極40を形成する際にキャリア増倍層62の半導体特性を劣化させないた

めに、キャリア増倍層62の表面上に堆積させて形成するものである。

【0070】なお、このような分離溝を有するAPDに関しては、例えば特開昭57-10987号公報に詳細に記載されている。

【0071】次に、本実施例の製造工程について説明する。

【0072】上記第1実施例の製造工程における第1のステップに続く第2のステップとして、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層66の中央部に円板状のマスク層を形成する。次に、通常のウェットエッチング法に基づいて、エッチング溶液として加熱したKOH溶液を用いることにより、絶縁層66及びガードリング層63の周辺部を除去して半導体基板61の表面を露出させ、分離溝69を形成する。続いて、通常のCVD法に基づいて、絶縁層66及び分離溝69の全面上にSiの窒化物を堆積させて絶縁層67、70を形成する。

【0073】第3のステップとして、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の周辺部に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のドライエッチング法に基づいて、絶縁層66、67の中央部を除去して降伏電圧制御層64の表面を露出させて受容部65を形成する。そして、通常の真空蒸着法に基づいて、受容部65及び絶縁層67上にA1を堆積させてオーミック電極層68を形成する。この後、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の内側部から降伏電圧制御層64の周辺部に至るオーミック電極層68の表面領域上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のウェットエッチング法に基づいて、絶縁層67の周辺部上と降伏電圧制御層64の中央部上とからオーミック電極層68を除去した後、この成形されたオーミック電極層68上からマスク層を除去する。

【0074】次に、本実施例の作用について説明する。

【0075】本実施例は、上記第1実施例の光電子増倍管とほぼ同様に作用する。ただし、半導体素子60においてキャリア増倍層62の層厚及び比抵抗は、上記実施例と比較して大きく設定されている。これにより、外部電圧源の駆動に基づいて、半導体素子60の内部に逆バイアス電圧が印加されると、半導体基板61とキャリア増倍層62との接合面から降伏電圧制御層64に向かって延びる空乏層が比較的大きい層厚で形成される。そのため、アバランシェ増倍領域の容量が小さくなるので、動作速度が向上する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、いっそう高感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0076】ここで、本発明は上記諸実施例に限られるものではなく、種々の変形を行うことが可能である。

【0077】また、上記諸実施例においては、半導体素子の受容部は露出して形成されている。しかしながら、



半導体素子の受容部は窒化物からなる絶縁層によって受容部を被覆して形成しても、光電子の照射による帯電が微量である場合には好適である。

【0078】また、上記諸実施例においては、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の構成材料として、Siをベースとして用いている。しかしながら、これら各種半導体層の構成材料としては、InGaAsを用いることも好適である。

【0079】さらに、上記諸実施例においては、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の導電型として、それぞれ $n^+$ 型、 $p$ 型及び $p^+$ 型を設定している。しかしながら、これら各種半導体層の構成材料としてGeをベースとして用いた場合、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の導電型として、それぞれ $p^+$ 型、 $n$ 型及び $n^+$ 型を設定しても、上記実施例とほぼ同様な作用効果が得られる。

【0080】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明の光電子増倍管においては、外部の微弱な光が光子として外囲器の入射窓に入射すると、光電陰極から光電子が放出されて半導体素子の受容部に入射する。この光電子のエネルギー消失によって生成された二次キャリアは、電子-正孔対を生成する過程を繰り返して増倍する。さらに、アバランシェ増倍領域に到達した一方のキャリアは、キャリア増倍層の構成分子をイオン化させるアバランシェ増倍過程を繰り返して増倍する。

【0081】ここで、キャリア増倍層はこれと異なる導電型を有する半導体基板上にエピタキシャル成長して形成されることにより、そのドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、アバランシェ増倍ゲイン $\times 30$

$\times$ は、アバランシェ増倍領域中におけるキャリアの発生位置に対する依存を低減し、良好なユニフォミティを得ている。

【0082】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流がオーミック電極層から出力されるので、光電子増倍管に入射した光子の個数は順次個別に検出される。そのため、従来の光電子増倍管による計測では、入射光子の有無を検出することに制限されていたことに比較し、本発明の光電子増倍管による計測では、入射光子の個数を測定することに拡張されている。したがって、本発明の光電子増倍管によれば、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光電子増倍管に係る第1実施例の構造を示す断面図である。

【図2】図1の光電子増倍管における半導体素子の構造を示す断面図である。

【図3】第1実施例に基づいて試作した光電子増倍管における出力パルス波高計測の結果を示すグラフである。

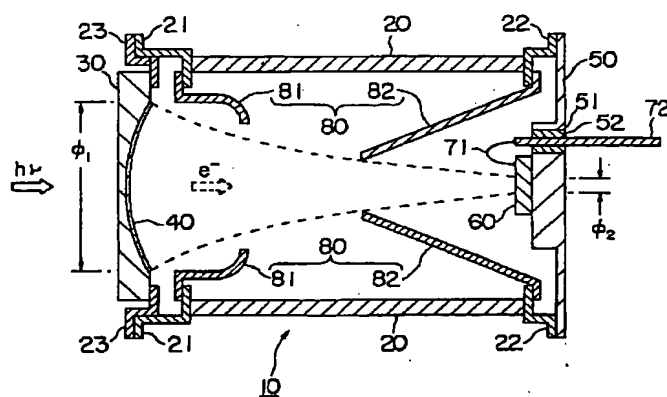
【図4】従来例として試作した光電子増倍管における出力パルス波高計測の結果を示すグラフである。

【図5】本発明の光電子増倍管に係る第2実施例における半導体素子の構造を示す断面図である。

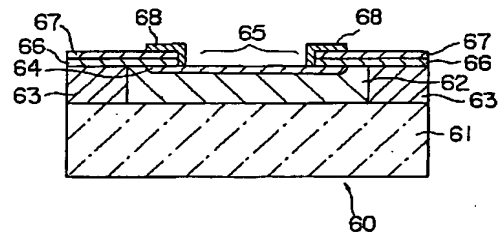
【符号の説明】

10…光電子増倍管、20…外囲器、30…入射窓、40…光電陰極、50…ステム、60…半導体素子、61…半導体基板、62…キャリア増倍層、64…降伏電圧制御層、65…受容部、67…絶縁層、68…オーミック電極層、69…分離溝、80…電子レンズ。

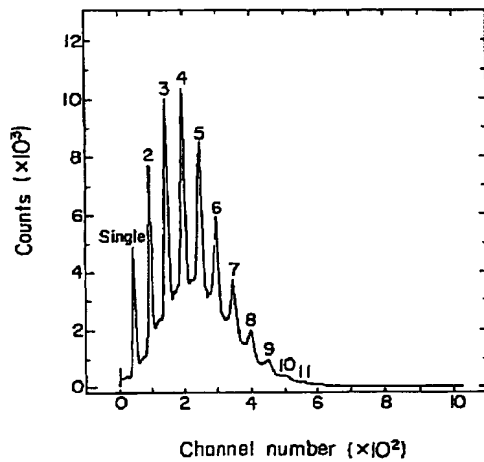
【図1】



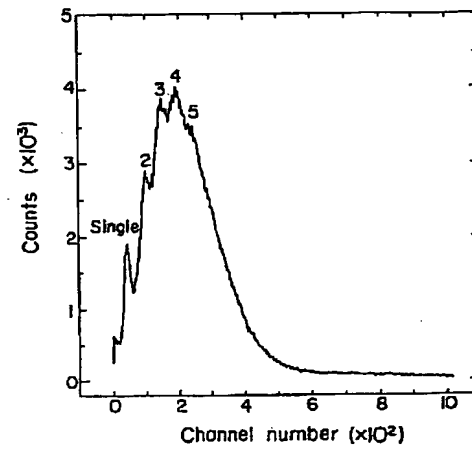
【図2】



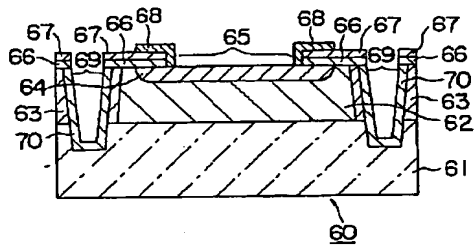
【図3】



【図4】



【図5】



フロントページの続き

(72)発明者 石川 嘉隆  
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(72)発明者 山本 晃永  
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載  
 【部門区分】第7部門第1区分  
 【発行日】平成14年1月18日(2002.1.18)

【公開番号】特開平8-148113  
 【公開日】平成8年6月7日(1996.6.7)  
 【年通号数】公開特許公報8-1482  
 【出願番号】特願平6-290070  
 【国際特許分類第7版】

H01J 43/12

H01L 31/107

【F I】

H01J 43/12

H01L 31/10 B

【手続補正書】

【提出日】平成13年7月30日(2001.7.30)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】特許請求の範囲

【補正方法】変更

【補正内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】 内部を高真空中に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極と対向して前記外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を検出する半導体素子とを備え、前記半導体素子は、第1導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第2導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第2導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成され当該降伏電圧制御層の一部表面を覆うオーミック電極層と、から構成され、当該降伏電圧制御層の表面のうち前記オーミック電極層に覆われていない部分の一部分は、真空中に放出された前記光電子を受容する受容部であり、前記受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されている、ことを特徴とする光電子増倍管。

【請求項2】 前記光電陰極と前記半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を収束して当該半導体素子の前記受容部に導く電子レンズをさらに備え、前記受容部の口径は10mm以下であるこ

とを特徴とする請求項1記載の光電子増倍管。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0011

【補正方法】変更

【補正内容】

【0011】ここで、半導体素子は、第1導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第2導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第2導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成され当該降伏電圧制御層の一部表面を覆うオーミック電極層と、から構成され、当該降伏電圧制御層の表面のうち前記オーミック電極層に覆われていない部分の一部分は、真空中に放出された前記光電子を受容する受容部であり、前記受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されている、ことを特徴とする。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0013

【補正方法】削除

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0019

【補正方法】変更

【補正内容】

【0019】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流が、オーミック電極層から外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。さらに、降伏電圧制御

層の受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されているので、絶縁層により被覆されている層の半導体特性を劣化させないようにできる。

【手続補正 5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0082

【補正方法】変更

【補正内容】

【0082】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流がオーミック電極層から出力されるので、光電子増倍管に入射した光子の個数は順次個別に検出され

る。そのため、従来の光電子増倍管による計測では、入射光子の有無を検出することに制限されていたことに比較し、本発明の光電子増倍管による計測では、入射光子の個数を測定することに拡張されている。したがって、本発明の光電子増倍管によれば、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。さらに、降伏電圧制御層の受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されているので、絶縁層により被覆されている層の半導体特性を劣化させないようにできる。